



3D-Drucken in der Schule



<http://3drucken.ch>

23.05.2013
1. Auflage

Gregor Lütolf
PHBern
gluetolf@gmail.com

Kurt Meister
Schule Steffisburg
kurt.meister@vs.steffisburg.ch





3D-Drucker - vom Profiwerkzeug zum Konsumerprodukt

Noch vor wenigen Jahren waren Geräte zur automatisierten Herstellung dreidimensionaler Objekte aus Plastik, Metall oder Holz sehr kostspielig und somit nur im industriellen Bereich anzutreffen. Durch die zunehmende Verbreitung von kleinen und vor allem günstigen Microcontrollern (z.B. Arduino¹) und Schrittmotoren, begannen 2006 vermehrt Tüftler selbst 3D-Drucker nach dem Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren zu entwickeln.

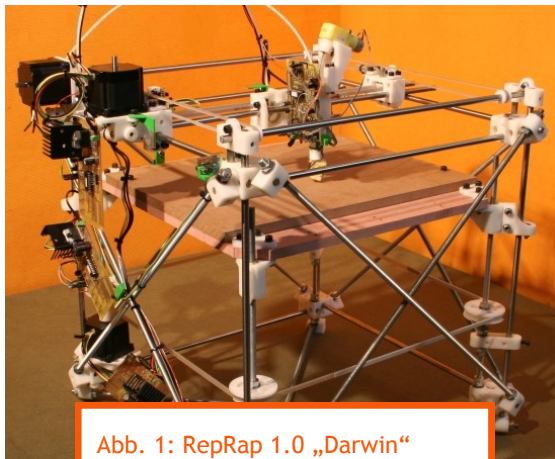


Abb. 1: RepRap 1.0 „Darwin“
prototype²

Die oft abenteuerlich anmutenden Geräte funktionieren dabei nach dem Prinzip einer Heissklebepistole, die mit Schrittmotoren von einem Computer gesteuert über eine plane Fläche gefahren wird. Die Arbeitsfläche selbst senkt sich nach jeder aufgetragenen Schicht um einen Bruchteil eines Millimeters, um anschließend mit der nächsten Schicht zu beginnen. Das erhitzte Material verhärtet in kürzester Zeit und es bildet sich langsam ein dreidimensionales Objekt. Dieser Vorgang kann je nach Objektgröße mehrere Stunden dauern. Der verwendete Kunststoff ist vergleichsweise günstig (ca. 50 CHF pro

Kilogramm) und ist überall im Alltag anzutreffen. Sei es als Joghurtbecher, Frischhaltedose oder als Verpackungsfolie. Die meisten Drucker besitzen einen einzelnen Druckkopf, mit dem sie eine Farbe Kunststoff auftragen können. Einige Drucker verwenden aber auch mehrere Druckköpfe für verschiedene Materialien. Zur Zeit sind ungefähr 20-30 verschiedene Farben verfügbar.



Abb. 2: Kunststoff PLA
(Polylactide)³

Seit etwa 2009 werden solche kostengünstige 3D-Drucker auch als Bausätze oder fertig montierte Geräte in kleinen Auflagen für 500-5000 CHF vertrieben. Ähnlich wie bei den ersten Laserdruckern sind diese Preise zwar noch hoch, aber durchaus für die private Nutzung erschwinglich. Zur Wahl stehen rund 100 verschiedene Modelle von mehr als 20 verschiedenen Herstellern⁴. Eines der beliebtesten und erfolgreichsten Modellen ist der Ultimaker⁵. Gefördert wird die aktuelle 3D-Druck-Bewegung durch die Vielzahl an frei verfügbaren Modellen auf Plattformen wie Thingiverse⁶.



Abb. 3: Schüler in Steffisburg
arbeiten mit dem Ultimaker





Im Unterschied zu herkömmlichen Druckern ist derzeit noch ein Zwischenschritt für die Aufbereitung der 3D-Modelle zum Druck nötig. Beim sogenannten Slicing wird das Objekt in viele einzelne horizontale Schichten zerlegt, jede davon nur den Bruchteil eines Millimeters dick. Jede Schicht besteht aus einem oder mehreren Pfaden, an denen der Druckkopf später entlang wandert.

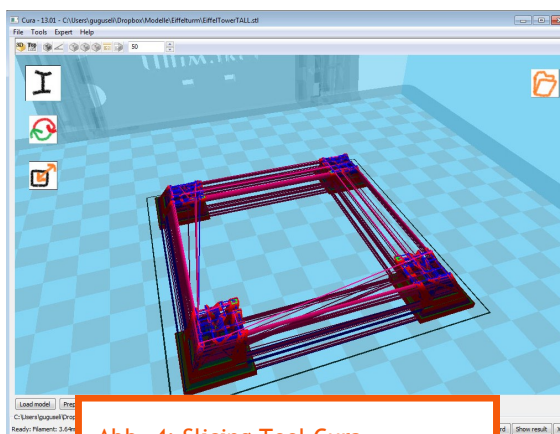


Abb. 4: Slicing Tool Cura

3D-Drucker werden heute in vielen verschiedenen Bereichen eingesetzt, besonders um schnell Prototypen herzustellen. Paläontologen scannen in Kenia zum Beispiel die Sammlung ihrer gefundenen Fossilien⁷ und machen sie übers Internet frei zugänglich, oder Architekten drucken ihre Entwürfe aus, um Kunden eine bessere Vorstellung vom geplanten Gebäude zu geben. Ärzte und Zahnärzte verwenden extra angefertigte Modelle zur Vorbereitung von Operationen, oder zur Unterstützung bei komplizierten Operationen. Selbst individuell gestaltete Lampenschirme, Schmuck oder gar Musikinstrumente lassen sich mit 3D-Druckern herstellen. Speziell wenn es um geringe Stückzahlen geht, ist ein 3D-Druck oftmals günstiger als der Weg durch die Spritzgussanlagen. In der Folge sind 3D-Drucker gerade für kreative und künstlerische Berufsgruppen ein spannendes neues Werkzeug.

Bedeutung für die Schule

Der 3D-Druck lässt sich in der Schule auf ganz unterschiedliche Arten einsetzen. So kann der Drucker als technisches Gerät selbst ein Unterrichtsthema sein und der Herstellungsprozess von 3D-Objekten mit Modellierungswerkzeugen am Computer thematisiert werden. Im Projektunterricht in einer Schulklasse in Holland wurde zum Beispiel ein eigener Drucker zusammengebaut. Dabei ging es vor allem um die Vermittlung von Grundlagen elektronischer Geräte und das Zusammenspiel zwischen Hard- und Software. Hierbei stand der Drucker als Gerät im Zentrum, an dem viele Aspekte anschaulich erklärt werden konnten (siehe auch: 3D ABC⁸, Realschule Güglingen⁹, oder FabLab München Schulprojekt 2011 mit einer 7. und 8. Klasse¹⁰).

Ein 3D-Drucker lässt sich aber auch als reines Werkzeug für verschiedene Schulfächer einsetzen. Genau wie man mit einem graphischen Taschenrechner eine Funktion im zweidimensionalen Raum visualisieren kann, lassen sich physische Objekte zum Anfassen mit Hilfe eines 3D-Druckers herzustellen. Beherrscht man erst einmal das 3D-Modellieren und 3D-Drucken, kann der 3D-Drucker als Experimentier- und Lernwerkzeug eingesetzt werden. So könnte man zum Beispiel einen Wettbewerb daraus machen, wer aus einem Meter Filament die höchste stabile Figur erstellen kann. Es könnte dabei auch mehrere Druckversuche geben, damit die gesammelten Erkenntnisse bei der Planung des nächsten Drucks berücksichtigt werden können.

Im Geographieunterricht lässt sich beispielsweise das Relief¹¹ einer Bergkette ausdrucken und Themen wie Faltengebirge oder Höhenlinien unmittelbar am Modell zeigen. Überraschend ist nicht nur für Schülerinnen und Schüler, wie gering eigentlich die Erhebungen von mehreren tausend Meter im Verhältnis zur Oberfläche ausfallen (siehe Abb. 5).





Abb. 5: Relief Yellowstone-Nationalpark, handbemalt

Im technischen Gestalten verwendet man heute verschiedenste Werkstoffe wie Papier, Ton, Stein, Holz, Stoff und vieles mehr. 3D-Drucker erlauben nun die Modellierung mit Plastik auf kreative Weise mit dem großen Vorteil der Wiederholbarkeit - es lassen sich einfach mehrere Kopien eines Objekts, auch in unterschiedlichen Größen, erzeugen. Zusätzlich nimmt die Anzahl verfügbarer Druckmaterialien ständig zu, so sind heute bereits etwa Laywood (eine Art Holz, Sägemehl mit Leim vermischt), Nylon oder Polystyrol verfügbar. Die gedruckten Objekte lassen sich weiterbearbeiten, so etwa durch Schleifen, oder mit Acryl- bzw. Modellbaufarben bemalen.

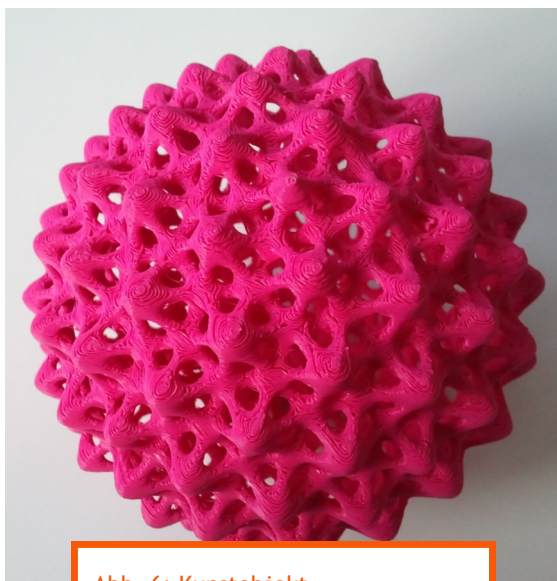


Abb. 6: Kunstobjekt

Im Musikunterricht kann zum Thema Instrumentenkunde beispielsweise eine individuell gestaltete Flöte von jedem Lernenden entwickelt und ausgedruckt werden. Verwendet man zusätzliche Materialien wie Nylonfäden lassen sich auch Zupfinstrumente wie eine Ukulele herstellen. Die Funktionsweise des jeweiligen Instruments kann so praxisnah von den Schülerinnen und Schülern erschlossen werden.



Abb. 7: Okarina (Blasinstrument)

Ähnlich lassen sich für den Technikunterricht mechanische Objekte wie Zahnräder oder ganze Getriebe ausdrucken und zusammensetzen. Gegenüber den klassischen Schaubildern mit Richtungspfeilen kann ein gedrucktes Modell zum Experimentieren eingesetzt werden und Fragen wie: Welche Achse dreht sich in welche Richtung und warum? beantwortet werden.



Abb. 8: Planetengetriebe





Im Chemie- und Biologieunterricht lassen sich Modelle von Molekülen, DNA oder Genstrukturen erstellen, die entweder als Anschauungsobjekte von der Lehrperson vorbereitet oder durch die Schülerinnen und Schüler selbst erstellt werden können. Durch die überschaubaren Druckkosten können die selbst gedruckten Modelle auch mit nach Hause genommen werden.

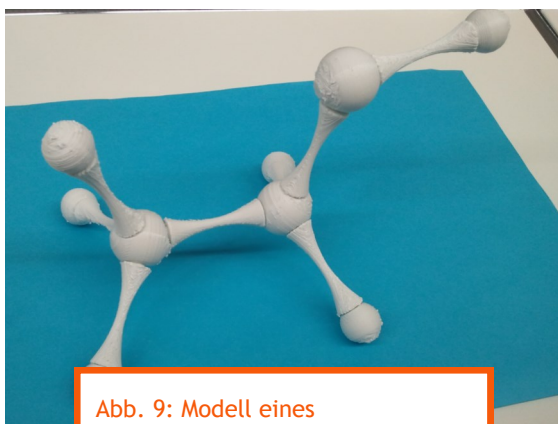


Abb. 9: Modell eines Kohlenwasserstoff-Moleküls

Betrachtet man den Herstellungsprozess eines 3D-Objekts für den Druck genauer, werden Fertigkeiten und Kenntnisse benötigt, die heute vor allem im Mathematik eine Rolle spielen. Mit Modellierungswerkzeugen wie SketchUp oder AutoCAD wird das gewünschte dreidimensionale Objekt am Computer erstellt. Dazu ist ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen nötig, dessen Schulung ein zentrales Anliegen des Geometrieunterrichts ist. Aufgrund der Verbreitung computergestützter Werkzeuge kommt heute dem Konstruieren auf Papier nicht mehr der gleiche Stellenwert wie früher zu. Der klassische Mathematikunterricht in der Schule ist jedoch - nicht zuletzt wegen der Komplexität des dreidimensionalen Raumes - stark auf die Ebene Geometrie ausgerichtet. Durch den Einsatz von 3D-Druckern im Unterricht können sowohl die nötigen Fertigkeiten zur Modellierung von Körpern mit zeitgemäßen Softwarewerkzeugen als auch die Vorstellung anhand selbst gedruckter Objekte geschult werden.



Abb. 10: Schüler arbeitet mit SketchUp

Wie angedeutet, können 3D-Drucker in vielen Fächern gewinnbringend eingesetzt werden. Sei es für die Herstellung von Anschauungsmaterial durch die Lehrperson oder zur Nutzung als Werkzeug für individualisiertes und selbständiges Lernen.

GüggelTown - Schüler drucken ihre eigene Stadt

In einem Schulprojekt wurde die Tauglichkeit der Technologie und der heutigen Geräte für den Schulunterricht untersucht. Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen und die Durchführung des Projekts GüggelTown¹² im Detail beschrieben.

Rahmenbedingungen

Das Projekt wurde mit einer 8./9. Klasse in einem Wahlfachkurs mit insgesamt 16 Doppelstunden durchgeführt. Es meldeten sich insgesamt 12 Schüler und eine Schülerin zum Kurs „Geometrisch-technisches Zeichnen“¹³ an. Betreut wurde der Kurs von Kurt Meister, welcher in seinem Unterricht seit mehreren Jahren SketchUp als Werkzeug für den Geometrieunterricht einsetzt. Bei der Lehrperson waren somit bereits solide Kenntnisse für die Modellierung mit CAD-Software vorhanden. Die Bereitstellung und technische Betreuung des 3D-Druckers und die Aufbereitung (Slicing) wurde von Gregor Lütolf (PHBern) übernommen, welcher das Projekt über den gesamten Versuchszeitraum begleitete.





Dem Projekt ging eine umfangreichen Evaluation verschiedener Drucker unterschiedlicher Preissegmente voraus. Die Wahl fiel auf den Ultimaker-Bausatz, der für das Schulprojekt angeschafft wurde. Der Aufwand für den Zusammenbau eines Ultimakers ist mit ca. zwei Tagen sehr zeitintensiv, ermöglicht jedoch einen guten Einblick in die Technik und schafft ein solides Verständnis für die relevanten Komponenten eines 3D-Druckers. Gegen einen Aufpreis lassen sich seit kurzem jedoch auch vormontierte Modelle bestellen.

Auf der Seite der Software wurden vorgängig ebenfalls mehrere Produkte evaluiert. Für das Modellieren von 3D-Objekten fiel die Wahl auf die Online-Plattform Tinkercad¹⁴, und das freie Desktop-Werkzeug SketchUp¹⁵. Für SketchUp wurde ein Zusatzplugin¹⁶ für den Export in das für 3D-Drucker geeignete Format STL installiert. Für das Slicing der Modelle wurde die freie Software Cura¹⁷ verwendet, die besonders mit dem Ultimaker gut harmonisiert. Je nach Schulstufe und Vorkenntnisstand der Schülerinnen und Schüler eignen sich jedoch unterschiedliche Tools.

Projektablauf



Abb. 11: Mit Tinkercad erstellte Schiffsmodelle

In der ersten Lektion wurden die Schülerinnen und Schülern ohne Vorbereitung mit dem Werkzeug Tinkercad, ein webbasiertes Werkzeug zur Erstellung von 3D-Modellen, konfrontiert. Anhand eines überwiegend bebilderten

Tutorials sollte ein Schiffsmodell entworfen werden, um sich mit dem Werkzeug und der dreidimensionalen Darstellung mit frei beweglicher Kamera vertraut zu machen. In der zweiten Lektion wurde ein weiteres Werkzeug - SketchUp - vorgestellt und ebenfalls anhand eines Tutorials selbstständig von den Schülerinnen und Schülern erschlossen und eingesetzt.

Nach der Einführung in die Modellierungswerkzeuge wurde das 3D-Druckverfahren mit den dafür benötigten Arbeitsschritten vorgestellt. In einer praktischen Übungsphase wurde von jedem Schüler ein kleines Objekt mit Tinkercad modelliert und selbstständig am Drucker ausgedruckt.



Abb. 12: Der Ultimaker druckt eine Spielfigur

Die Schülerinnen und Schüler erhielten den Auftrag eine kleine Stadt, bestehend aus mehreren Häusern, zu entwickeln. Der Auftrag wurde an ein ähnliches Projekt von Kide¹⁸ angelehnt. Als Vorgabe diente ein Stadtplan mit unterschiedlich großen Parzellen auf Papier. Gemeinsam wurden die Felder des Stadtplans den einzelnen Schülerinnen und Schülern zugeordnet. Nach der Bekanntgabe einiger Rahmenbedingungen, etwa zur maximal druckbaren Objektgröße, erfolgte die Entwicklung der einzelnen Gebäude weitestgehend selbstständig. Zunächst sollte eine Ideenskizze auf Papier erarbeitet werden. Anschließend konnte eines der vorgestellten Werkzeuge (Tinkercad, SketchUp) zur Model-





Abb. 13: Die gedruckten Gebäude der Projektstadt GüggelTown

lierung in 3D gewählt werden. Bei der Modellierung muss u.a. beachtet werden, dass der Drucker nicht jede beliebige Formen drucken kann. Filigrane Elemente können zum Beispiel im anschließenden Slicing-Prozess verloren gehen und zu grosse Überhänge lassen sich mit dem verwendeten Druckverfahren nicht schön herstellen. Die entwickelten Gebäudemodelle waren ganz unterschiedlich und reichten von komplexen Phantasiegebilden zu Nachbauten realer Gebäude (siehe Abb. 13).

Nach der Modellierung wurden die einzelnen Gebäude am Drucker ausgedruckt. Aufgrund der Objektgrößen dauerte der Druck aller Modelle insgesamt rund 120 Stunden und wurde deshalb zum Großteil außerhalb der Unterrichtszeit (über Nacht) durchgeführt. Erst durch die Optimierung der Druckeinstellungen konnte das Projekt realisiert werden. Eine Verkleinerung des Stadtplans und der Modelle würde diesen hohen Zeitbedarf jedoch deutlich reduzieren können.

In der letzten Lektion wurde auf ausdrücklichen Wunsch der Lernenden eine Projektpräsentation für Eltern und weiteren Interessenten durchgeführt. Die Schülerinnen und Schü-

ler stellten das 3D-Druckverfahren, ihre Projektergebnisse und deren Entstehungsprozess in Form mehrerer kleiner Informationsinseln vor. Die Besucher konnten diese Inseln nach eigenem Interesse anlaufen. Die Schülerinnen und Schüler erklärten zum Beispiel live am Drucker wie dieser arbeitet und wie am PC Modelle erstellt werden können. Die Präsentation erlangte sogar ein Echo in der lokalen Presse¹⁹.

Erkenntnisse

Im Vergleich zum etablierten 2D-Drucken ist die Erkenntnis wichtig: Nicht alles was man modellieren kann, lässt sich auch so drucken. Dienste im Internet wie „Will it 3D-Print?“²⁰ spezialisieren sich auf genau diese Frage und lassen sich vor dem Start des Druckauftrags aufrufen. Nutzt man fertige 3D-Modelle aus dem Internet entscheidet deren Qualität häufig über den Erfolg des Druckvorgangs. Auch hier bieten wiederum Dienste wie der von Netfabb²¹ Hilfe an, um Modelle für den 3D-Druck zu reparieren und zu optimieren. Stellt man Modelle selbst her, oder lässt die Schülerinnen und Schüler Modelle





entwickeln, müssen die Rahmenbedingungen des Druckers und des Verfahrens beachtet werden, was durchaus im Widerspruch zur ausgeprägten Phantasie bei der Gestaltung von Modellen stehen kann.

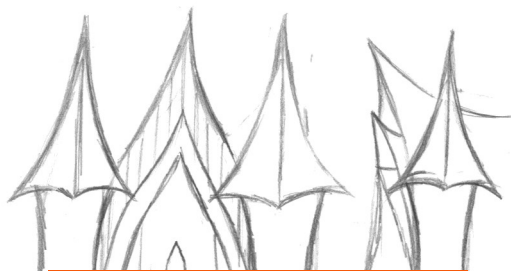


Abb. 14: Ob sich dieses Gebäude wohl drucken lässt?

Ein echtes Problem für den Schuleinsatz ist die relativ langsame Druckgeschwindigkeit, die eine zeitnahe Herstellung von Schülerarbeiten spürbar behindert, gerade wenn man nur einen Drucker zur Verfügung hat. Projekte wie OctoPrint²², die einen 3D-Drucker in Kombination mit einem Raspberry Pi-Modul²³ netzwerkfähig machen, können hier zumindest teilweise helfen. Mit ihnen lässt sich der Drucker auch von daheim aus mit Druckaufträgen versorgen und überwachen.

Für die Schule besonders geeignet sind kleine 3D-Drucker, die leicht zu transportieren sind und die Modellgrösse und damit die langen Druckzeiten bereits durch die Bauform des Geräts begrenzen. Auf grosse Geräte mit mehreren Druckköpfen und damit etwa der Möglichkeit zum mehrfarbigen Ausdruck sollte auf Grund der höheren Komplexität in der Praxis lieber zu Gunsten mehrerer preiswerter, kleiner Modelle verzichtet werden (Stand der Technik Anfangs 2013).

Die Kosten für die Anschaffung der Geräte und des Verbrauchsmaterial am Beispiel des Ultimakers ist überschaubar und pro Drucker etwa mit dem Kauf und Betrieb eines einzelnen Notebooks zu vergleichen. Da 3D-Drucker ebenso vielfältig eingesetzt werden können

wie Computer, scheint die Investition bereits heute gerechtfertigt. Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass in den nächsten Jahren die Preise weiter fallen werden. Einige Hersteller bewerben bereits neue Modellgenerationen für unter 500 Dollar. Offen bleibt der personelle Betreuungsaufwand der Geräte, für die es heute noch keine Leasing- und Wartungsverträge wie für den Schulkopierer gibt. Davon ausgehend ist das Thema 3D-Drucken derzeit vor allem noch technisch versierten Lehrpersonen vorbehalten, die mit hohem Eigenengagement die Wartung und Einstellung der Geräte übernehmen.



Abb. 15: Der Kurs hat Spass gemacht

Bei der Befragung der Schülerinnen und Schüler zum Kurs wurde von allen angegeben, dass er Spass gemacht hat, und sie sehr motiviert waren. Die meisten hatten zuvor noch nichts von einem 3D-Drucker gehört, und nur zwei der 13 Schülerinnen und Schüler hatten schon am Computer mit einem CAD-Programm gearbeitet. Eine Schülerin gab an, dass sie ihr räumliches Vorstellungsvermögen dadurch verbessern konnte. Vielen gefiel es, selber aktiv zu sein, und eine eigene Idee von der Skizze über die Konstruktion im CAD, bis zum selbständigen Drucken am 3D-Drucker umzusetzen. Auf die Frage, ob sie den Kurs weiterempfehlen würden, antworteten alle mit Ja. Dass das stimmt, hat sich dann in den Anmeldezahlen für nächstes Schuljahr gezeigt. Der Kurs müsste doppelt geführt werden, um alle Schülerinnen und Schüler daran teilnehmen lassen zu können. Geschätzt wurde die Arbeit in Teams, und die Aufforderung einander zu helfen, die Fertigkeiten und das Wissen un-





tereinander auszutauschen. Von einigen Schülerinnen und Schülern der 9. Klasse wurde das Wahlfach als gute Vorbereitung auf die bevorstehende Lehre angesehen.

Wir haben von Lehrerseite aus beobachtet, dass der 3D-Drucker die Neugier der Schülerinnen und Schüler anspricht, sie beginnen zu experimentieren. Das Erlernen der Grundlagen der CAD-Software funktioniert gut mit den Tutorials. Einige Schülerinnen und Schüler haben während dem Kurs von anderen Erlebnissen mit 3D-Druckern berichtet. Unserer Meinung nach fördert der 3D-Drucker in Kombination mit der CAD-Software am Computer das individuelle, selbständige Lernen. Die Schülerinnen und Schüler können nach einer Idee selber ein Objekt herstellen, das sie dann anschliessend in den Händen halten können (Personal Fabrication). Wir konnten uns die Modellstadt GuggelTown bis zum Schluss nicht richtig vorstellen, das gelang erst durch die ausgedruckten Häuser wirklich, was uns beeindruckt hat. Die Volumenberechnung des Hauses bereitete vielen Schülerinnen und Schülern mehr Schwierigkeiten als gedacht. Theoretisch Gelerntes danach praktisch einzusetzen ist immer wieder eine Herausforderung.

Unserer Meinung nach, lassen sich mit einem 3D-Drucker, oder allgemeiner, mit Geräten aus einem FabLab²⁴, und einer Kombination der Schulfächer Mathematik, Gestalten und weiteren gute Bedingungen für aktives Lernen schaffen.

Fazit

Den gesamten Prozess von der Idee zum fertig gedruckten Objekt ist heute noch mit vielen Stolpersteinen verbunden und die Drucker sind längst noch nicht so wartungsfrei und einfach wie konventionelle Tintenstrahldrucker. Unzählige Einstellungsmöglichkeiten wie etwa Temperaturen und Arbeitsgeschwindigkeit erlauben die Optimierung des Druckergebnisses und erfordern eine gewisse

Erfahrung und anfangs auch eine Beaufsichtigung des Druckprozesses. Hier sind die Druckerhersteller gefordert in Zukunft einfachere und fehlertolerantere Modelle zu produzieren. Eine Entwicklung die sich bereits in aktuellen Produkte wie dem Cube oder CubeX von 3D-Systems niederschlägt. Ebenso wie die Hardware ist die Software noch nicht so einfach, wie sie sein könnte. Die verschiedenen Arbeitsschritte zum Slicing und die Umwandlung in passende Formate werden in zukünftigen Softwarelösungen deutlich vereinfacht werden. Ähnlich wie das Drucken in 2D wird es nur noch einen einfachen "Drucken"-Knopf geben, der alle nötigen Schritte erledigen wird.

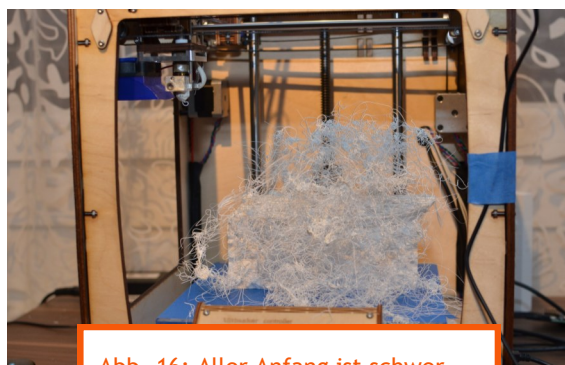


Abb. 16: Aller Anfang ist schwer

Eine Zusammenstellung von Software zum Erstellen, Bearbeiten und Herunterladen von für den Druck vorbereiteten 3D-Modellen haben wir auf unserem 3drucken.ch-Blog²⁵ veröffentlicht. Im selben Blog haben wir auf einer weiteren Seite die benötigten Hardwareteile²⁶ für eine Beschaffung aufgelistet.

Ohne die Vernetzung mit einer Internetcommunity könnte sich das 3D-Drucken nie mit dieser Dynamik entwickeln. Es ist wichtig, dass wir alle unseren Beitrag zu dieser Community leisten, erscheine er uns auch noch so klein. Das Motto lautet: "Sharing is caring" oder "Kultur des Teilens".





Links

- 1 <http://arduino.cc>
- 2 <http://reprap.org>
- 3 <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide>
- 4 <http://3druck.com/3d-drucker-liste>
- 5 <http://www.ultimaker.com>
- 6 <http://thingiverse.com>
- 7 <http://www.africanfossils.org>
- 8 <http://3dabc.nl>
- 9 <http://www.rsg.hn.schule-bw.de/3d/index.html>
- 10 <http://wiki.fablab-muenchen.de/download/attachments/2130735/presentationsschulprojekt2011.pdf>
- 11 <http://3drucken.ch/p/reliefs.html>
- 12 <http://www.3drucken.ch/p/gueggeltown.html>
- 13 <http://3dgeometrie.com>
- 14 <http://www.tinkercad.com>
- 15 <http://www.sketchup.com>
- 16 <http://www.guitar-list.com/download-software/convert-sketchup-skp-files-dxf-or-stl>
- 17 <http://software.ultimaker.com>
- 18 <http://www.playkide.com/kideville.html>
- 19 <http://tt.bernerzeitung.ch/region/thun/Schueler-drucken-ihre-eigene-Stadt/story/24268666>
- 20 <http://willit3dprint.com>
- 21 <http://cloud.netfabb.com>
- 22 <https://github.com/foosel/OctoPrint>
- 23 <http://www.raspberrypi.org>
- 24 <http://fab.cba.mit.edu>
- 25 <http://3drucken.ch/p/software.html>
- 26 <http://3drucken.ch/p/hardware.html>

Literatur

Anderson, Chris. Makers: The New Industrial Revolution. Random House. 2012.

Canessa, Enrique, Fonda Carlo und Zennaro, Marco (Editoren). Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development, ICTP Triest. 2013. Frei verfügbar unter <http://sdu.ictp.it/3D/book.html>

Fastermann, Petra. 3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt. Springer Vieweg. 2012.

Frauenfelder, Mark (Herausgeber). Make: Ultimate Guide to 3D Printing. Oreilly & Associates Incorporated. 2012.

Gershenfeld, Neil A. Fab, The Coming Revolution on Your Desktop - From Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books. 2005.

Lipson, Hod und Kurman, Melba, Fabricated: The New World of 3D Printing. John Wiley & Sons. 2013.

Schreyer, Alexander C., Architectural Design with SketchUp. John Wiley & Sons. 2013.

